

Н.А. САВЧЕНКО, С.Ю. ШЕВЧЕНКО**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГРАФИКА НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЯ**

Целью статьи является теоретическое исследование экономических и технических показателей, позволяющих определить эффективность работы кинетических накопителей энергии при подключении в систему электроснабжения потребителя с целью регулирования суточного графика нагрузки. Являясь реверсивными устройствами, кинетические накопители энергии позволяют частично или полностью разделить во времени процессы выработки и потребления энергии и таким образом эффективно регулировать графики нагрузки. В инерционных накопителях энергии, установленных в систему электроснабжения потребителя, аккумуляция энергии осуществляется из электрической сети или альтернативных источников энергии, ее хранение и выдача при необходимости на электроприемники потребителя. Для проведения исследований использовались теория основ электротехники и теоретической механики, теория построения графиков электрической нагрузки и определения его характеристик, методы экономических расчетов эффективности внедрения новых технологий при различных тарифах оплаты мощности в электрических сетях. Представлены технические показатели оценки эффективности применения кинетических накопителей энергии при регулировании суточных графиков нагрузки потребителя, на основании анализа которых выполнен выбор группы показателей, оказывающих влияние на повышение равномерности графиков нагрузки и выбора метода регулирования. Обосновано применение экономических методов расчета эффективности внедрения кинетических накопителей энергии при двухставочном и дифференциальном тарифах оплаты мощности, что позволит минимизировать затраты потребителя на оплату электроэнергии. Разработанная методика комплексного определения эффективности применения кинетических накопителей энергии для регулирования графиков нагрузки потребителя позволяет обосновать выбор накопителя энергии в каждом конкретном случае выравнивания графика нагрузки.

Ключевые слова: кинетический накопитель энергии (КНЭ), график электрической нагрузки (ГЭН), технические показатели эффективности, экономические показатели эффективности.

Н.П. САВЧЕНКО, С.Ю. ШЕВЧЕНКО**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КІНЕТИЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ СПОЖИВАЧА**

Метою статті є теоретичне дослідження економічних і технічних показників, що дозволяють визначити ефективність роботи кінетичних накопичувачів енергії при підключенні до системи електропостачання споживача з метою регулювання добового графіка навантаження. Будучи реверсивними пристроями, кінетичні накопичувачі енергії дозволяють частково або повністю розділити в часі процеси вироблення та споживання енергії і таким чином ефективно регулювати графіки навантаження. У інерційних накопичувачах енергії, встановлених в систему електропостачання споживача, акумулювання енергії здійснюється з електричної мережі або альтернативних джерел енергії, її зберігання та видача при необхідності на електроприймачі споживача. Для проведення досліджень використовувалися теорія основ електротехніки та теоретичної механіки, теорія побудови графіків електричного навантаження і визначення його характеристик, методи економічних розрахунків ефективності впровадження нових технологій при різних тарифах оплати потужності в електричних мережах. Представлені технічні показники оцінки ефективності застосування кінетичних накопичувачів енергії при регулюванні добових графіків навантаження споживача, на підставі аналізу яких виконаний вибір групи показників, що впливають на підвищення рівномірності графіків навантаження і вибору методу регулювання. Обґрунтовано застосування економічних методів розрахунку ефективності впровадження кінетичних накопичувачів енергії при двоставковому і диференціальному тарифах оплати потужності, що дозволить мінімізувати витрати споживача на оплату електроенергії. Розроблена методика комплексного визначення ефективності застосування кінетичних накопичувачів енергії для регулювання графіків навантаження споживача дозволяє обґрунтувати вибір накопичувача енергії в кожному конкретному випадку вирівнювання графіка навантаження.

Ключові слова: кінетичний накопичувач енергії (КНЕ), графік електричного навантаження (ГЕН), технічні показники ефективності, економічні показники ефективності.

N. SAVCHENKO, S. SHEVCHENKO**ANALYSIS OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF KINETIC ENERGY STORAGE TO ADJUST THE CONSUMER LOAD SCHEDULE**

The aim of the article is a theoretical study of economic and technical indicators that allow to determine the efficiency of kinetic energy storage when connected to a consumer power supply system in order to regulate the daily load schedule. Being reversible devices, kinetic energy storage devices allow to partially or completely separate in time the processes of energy production and consumption and thus effectively regulate load schedules. In inertial energy storage devices installed in the consumer's power supply system, energy storage is carried out from the electric network or alternative energy sources, its storage and delivery, if necessary, to the consumer's power consumers. The research was carried out using the theory of the foundations of electrical engineering and theoretical mechanics, the theory of constructing graphs of electrical load and determining its characteristics, methods of economic calculations of the effectiveness of introducing new technologies at various rates for paying for power in electric networks. Technical indicators are presented for assessing the effectiveness of the use of kinetic energy storage devices for regulating daily consumer load schedules, based on the analysis of which a group of indicators has been selected that affect the uniformity of load schedules and the choice of regulation method. The application of economic methods for calculating the efficiency of introducing kinetic energy storage devices at two-stage and differential tariffs for power payment is substantiated, which will minimize consumer spending on electricity. The developed methodology for the comprehensive determination of the effectiveness of the use of kinetic energy storage devices for regulating consumer load schedules makes it possible to justify the choice of energy storage in each specific case of balancing the load schedule.

Key words: kinetic energy storage (KES), electric load graph (LEG), technical performance indicators, economic performance indicators.

Введение. Необходимость решения проблемы аккумуляции энергии в энергетической сфере хозяйствования привела в последние годы к бурному развитию кинетических накопителей энергии, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другими видами накопителей, такими как высокая удельная энергетическая емкость, абсолютная экологичность, широкий диапазон варьирования режимами заряда и разряда, и практически неограниченным сроком эксплуатации. Применение КНЭ для регулирования суточных графиков нагрузки потребителя на данный момент теоретически и экспериментально исследуется во многих научных трудах, поэтому определение эффективности их применения является актуальной задачей. Методики оценки эффективности работы накопителей энергии достаточно разнообразны и каждая имеет представление определенной группой показателей, но в целом условно они могут быть разделены на технические и экономические, которые могут быть взаимосвязаны между собой. Определяющими факторами при выборе методики является во-первых вид накопителя энергии и его конструкция, что определяет его технические показатели эффективности, во-вторых область и цель применения накопителя, соответственно определяет экономические показатели эффективности. В результате исследования научных трудов, в которых основополагающими были технические показатели эффективности работы кинетических накопителей энергии, установлено что увеличение энергоемкости накопителя прямопропорционально зависит от массы маховика, который является одним из основных элементов, а конструктивное исполнение накопителя имеет прямое влияние на КПД устройства в целом [1-4]. Методики, основанные на оценке эффективности работы любого вида накопителей энергии с помощью экономических показателей, базируются на сведениях к минимуму затрат на стоимость электроэнергии для потребителя [5,6]. Таким образом, единого подхода по определению показателей эффективности применения кинетических накопителей энергии для регулирования ГЭН потребителя на данном этапе не разработано.

Отсутствие единой методики определения эффективности работы накопителей в системах электроснабжения потребителей существенно затрудняет оценку целесообразности их применения в сравнении с другими вариантами накопителей.

Цель исследования. Разработать методику, которая содержит минимальную группу экономических и технических показателей, позволяющих проанализировать эффективность применения кинетических энергонакопителей для регулирования суточных графиков нагрузки потребителя.

Методи, объект и предмет исследования. В основу работы положен системный подход при проведении теоретических исследований, основанный на фундаментальных положениях теории расчета электрических сетей, теории расчета механических систем, основ экономической теории. *Объект исследования* – процесс выравнивания нагрузки при

подключении в систему электроснабжения потребителя КНЭ. *Предмет исследования* – группы технических и экономических показателей, характеризующих эффективность применения КНЭ.

Основной материал.

Подключение кинетических накопителей в систему электроснабжения потребителей позволяет решить ряд задач: первостепенной – регулирование графика нагрузки потребителя и сопутных – регулирование качества электрической энергии, обеспечение бесперебойного питания, что значительно повышает надежность и энергоэффективность работы электрических сетей напряжением 0,4 кВ.

Регулирование графиков нагрузки потребителей является основой энергоэффективности процессов производства, передачи и потребления энергии.

Процесс регулирования (выравнивания) графика нагрузки заключается в том что в часы спада нагрузки КНЭ работает как потребитель электроэнергии, а в часы максимума как генератор, что позволяет управлять режимами энергопотребления внутренней системы электроснабжения потребителя [7]. Таким образом, эффективность применения КНЭ в системе электроснабжения потребителя будет выражаться в получении более сглаженного графика нагрузки как представлено на рис.1.

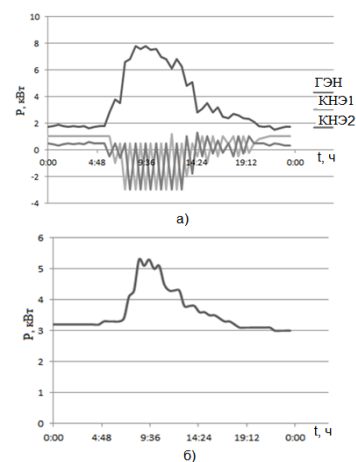


Рис.1. Регулирование ГЭН потребителя:

а) исходный ГЭН потребителя с нагрузочными диаграммами КНЭ; б) суммарный ГЭН потребителя

Для оценки эффективности применения КНЭ следует выделить его основные технические показатели такие как энергоемкость, быстродействие, время заряда и разряда, количество циклов работы, к.п.д.

Аккумулирующим элементом в составе КНЭ является маховик, от характеристик которого зависят все вышеназванные показатели.

Уравнения движения маховика, которое справедливо как в режиме заряда так и разряда, имеет вид [8]

$$M_m = M_{\text{дин}} - M_{\text{тр}} = J \frac{d\omega}{dt} - M_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где M_m – внешний момент, который является активным (движущим) моментом при заряде, или реактивным (тормозным) моментом при разряде маховика;

M_{din} – динамический момент, знак которого определяется угловым ускорением $\frac{d\omega}{dt}$;

M_{tr} – момент трения.

Уравнение баланса энергии будет выглядеть [8]:

$$J \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2} - \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{tr} dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega M_m dt \quad (2)$$

где ω_1, ω_2 – начальная и конечная угловые скорости маховика;

t_1, t_2 – соответствующие значения времени.

В общем виде уравнение (2) имеет вид

$$W_k - W_{tr} = W, \quad (3)$$

где W_k – кинетическая энергия;

W_{tr} – энергия потерь на трение;

W – полная энергия, которая отводится от маховика.

Максимальная мощность, накопленная КНЭ с маховиком зависит от его массы, геометрических размеров и скорости вращения [9]:

$$P_{max.KЭН}(t) = M_{din.max} \cdot \omega_{max}(t) \quad (4)$$

где $M_{din.max}$ – максимальный динамический момент [9]:

$$M_{din.max} = J \cdot \omega_{max}(t), \quad (5)$$

тогда

$$P_{max.KЭН}(t) = J \cdot \omega_{max}^2(t) \quad (6)$$

Время разряда маховика на среднюю нагрузку определяется по формуле:

$$t_r = \frac{W_k}{P_{sr}}, \quad (7)$$

где P_{sr} – средняя потребляемая мощность.

Взаимосвязь параметров накопителя при заряде и разряде определяется законом сохранения энергии и выражается очевидным соотношением [37]:

$$P_z t_z \eta = P_r t_r, \quad (8)$$

где P_z и P_r – средние значения мощностей зарядного и разрядного процессов;

η – КПД накопителя энергии.

Таким образом при регулировании графика нагрузки эффективность применения КНЭ может быть определена минимальным набором технических показателей, выраженной формулой (8).

Применение КНЭ также влечет за собой экономические выгоды для потребителя при различной

тарифной политике энергоснабжающих организаций. Перенос нагрузки в низкооплачиваемые тарифные зоны ведет к снижению стоимости потребленной электроэнергии.

Возможности потребителей минимизировать свои расходы на закупку электроэнергии в общем виде определяются критерием [5]:

$$\min \sum_{k=1}^K 3_k, \quad (9)$$

где 3_k – расходы потребителя на покупку электрической энергии (мощности) или ее генерацию;

K – количество интервалов времени, на которые разбивается суточный ГЭН.

Тогда при двухставочном тарифе с платой за мощность, при пиковом значении максимума нагрузки в энергосистеме, и электроэнергию вышеупомянутый критерий примет вид [5]

$$\min(C_p P_{max} + \sum_{k=1}^K C_{e,k} W_k), \quad (10)$$

где C_p – удельная стоимость одного киловатта суточного максимума нагрузки;

$C_{e,k}$ – удельная стоимость одного киловатт-часа электроэнергии на интервале времени k ;

P_{max} – максимум нагрузки у потребителя (в часы, определенные энергосистемой)

W_k – количество потребляемой электроэнергии на интервале времени k .

Экономия средств за заданный интервал времени T при использовании КНЭ:

$$E_k = U_n \Delta P_n k + U_E \sum_{i=1}^n \Delta W_{pi} + U_E \sum_{i=1}^n \Delta W_{ti} - W_{KES}(1-\eta)U_E - U_{KES} - U_O \quad (11)$$

где U_n – стоимость заявленной мощности;

ΔP_n – снижение заявленной мощности;

U_E – цена потребленной энергии;

W_{pi} – снижение потерь энергии на нагрев в i -м проводнике за T ;

W_{ti} – снижение потерь энергии в i -м трансформаторе за T ;

W_{KES} – энергия, перераспределенная КНЭ за T ;

U_{KES} – стоимость КНЭ;

U_O – стоимость обслуживания КНЭ.

При дифференцированном тарифе на электроэнергию критерий (9) примет вид [10]

$$\min \sum_{t=1}^T C_e^t \sum_{k \in K^t} W_k, \quad (12)$$

где T – количество зон, на которые разбивается суточный график потребления электроэнергии;

C_e^t – удельная стоимость одного киловатт-часа электроэнергии в зоне суток t ;

K_t – множества, определяющие интервалы времени внутри соответствующих зон $t \in T$.

Экономия средств за заданный интервал времени T использования КНЭ при дифференцированном тарифе:

$$E_k = \sum_{j=1}^m (W_{j1} U_{Ej} + W_{j2} U_{Ej} + U_{Ej} \sum_{i=1}^n \Delta W_{ni} + U_{Ej} \sum_{i=1}^n \Delta W_{ti} - W_{KES} (1 - \eta) U_{Ej}) - U_{KES} - U_o, \quad (13)$$

где U_{Ej} – стоимость потребленной энергии в j -й тарифной зоне;

W_{j1} – потребленная энергия в j -й тарифной зоне до введения КНЭ;

W_{j2} – потребленная энергия в j тарифной зоне после введения КНЭ;

m – число тарифных зон.

В целом анализ экономических показателей эффективности применения КНЭ при регулировании ГЭН сводится к снижению затрат на закупку электроэнергии независимо от вида тарифного плана путем минимизации потерь в элементах системы электроснабжения и стремления к равномерному распределению нагрузки в течении суток.

Выводы. Полученные результаты проведенного теоретического исследования методов определения эффективности применения кинетических накопителей энергии в процессе выравнивания графиков нагрузки потребителя позволили выявить основные группы технических и экономических показателей, на основе расчета которых может быть принято решение о целесообразности их применения в процессе регулирования графиков нагрузки. Таким образом, была сформирована методика определения эффективности применения кинетических накопителей энергии, учитывающая как технические так и экономические показатели.

Список литературы

1. Солодовников Д.Н. Применение накопителей энергии в энергетических системах транспортных и технологических машин // Теория и практика современной науки. 2017. № 2 (20). – С. 534-538.
2. Андреев С.А. Аккумуляция энергии в маломощных геосистемах автономного электроснабжения / С.А. Андреев, В.И. Загинайлов, Д.В. Шибаров // Вестник. 2017. № 5 (20). С. 70-76.
3. Воропай Н.И. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы / Н.И. Воропай, В.А. Стенников // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1. – С. 64 - 73.
4. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // Ползуновский вестник. 2013. №4(2). – С. 176 –181.
5. Находов В. Ф. Оценка потенциала снижения затрат энергосистемы в результате выравнивания суточных графиков ее электрической нагрузки / В. Ф. Находов, А. И. Замулко, Мохаммад Аль Шарари, В. В. Чекамова. // Вісник НТУ «ХПІ». 2016. № 4.(1176) . – С. 21–31.
6. Воропай Н.И. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей / Н.И. Воропай, З.А. Стычинский, Е.В. Козлова, В.С. Степанов, К.В. Суслов // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1. – С. 84-90.
7. Shevchenko S. Yu. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when

connecting the kinetic energy storage to the power supply system / S. Yu. Shevchenko, N. A. Savchenko, A. V. Tretjak // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – №6. – С. 69 – 73. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.11.

8. Бут Д.А. Накопители энергии / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. Под редакцией Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

9. Ассоциация «НП Совет рынка». Исследование №2 «Новые энергетические технологии» [Электронный ресурс] / Д.О.Станкевич, А.Г.Николаев, Е.В.Андреева, М.Н.Путляева, В.И.Клепиков, А.В.Шалаев. – Москва, 2017. – 144с. Режим доступа: https://www.npsr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf.

10. Находов В. Ф. Определение первоочередных направлений совершенствования дифференцированных тарифов на электрическую энергию. / В. Ф. Находов, А. И. Замулко, Мохаммад Аль Шарари, Ю. Н. Исаенко. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №1(78). – С. 24–32.

References (transliterated)

1. Solodovnikov D.N. Primeneniye nakopiteley energii v energeticheskikh sistemakh transportnykh i tekhnologicheskikh mashin // Teoriya i praktika sovremennoy nauki. 2017. № 2 (20). – pp. 534-538.
2. Andreyev S.A. Akkumulirovaniye energii v malomoshchnykh geliosistemakh avtonomnogo elektrosnabzheniya / S.A. Andreyev, V.I. Zaginaylov, D.V. Shibarov // Vestnik. 2017. № 5 (20). pp. 70-76.
3. Voropay N.I. Integrirovannyye intellektual'nyye energeticheskiye sistemy / N.I.Voropay, V.A.Stennikov // Izvestiya RAN. Energetika. 2014. №1. – pp. 64 - 73.
4. Smolentsev N.I. Nakopiteli energii v lokal'nykh elektricheskikh setyakh / N.I.Smolentsev // Polzunovskiy vestnik. 2013. №4(2). – pp. 176 –181.
5. Nakhodov V. F. Otsenka potentsiala snizheniya zatrat energosistemy v rezul'tate vyravnivaniya sutochnykh grafikov yeye elektricheskoy nagruzki / V. F. Nakhodov, A. I. Zamulko, Mokhammad Al' Sharari, V. V. Chekamova. // Visnik NTU «KHPi». 2016. № 4.(1176) . – pp. 21–31.
6. Voropay N.I. Optimizatsiya sutochnykh grafikov nagruzki aktivnykh potrebiteley / N.I. Voropay, Z.A. Stychinski, Ye.V. Kozlova, V.S. Stepanov, K.V. Suslov // Izvestiya RAN. Energetika. 2014. №1. – pp. 84-90.
7. Shevchenko S. Yu. Managing the load schedule of the administrative building taking into account emerging risks when connecting the kinetic energy storage to the power supply system / S. Yu. Shevchenko, N. A. Savchenko, A. V. Tretjak // Yelektrotekhnika i yelektromekhanika. – 2017. – №6. – pp. 69 – 73. doi: 10.20998/2074-272KH.2017.6.11.
8. But D.A. Nakopiteli energii / D.A. But, B.L. Aliyevskiy, S.R. Miziuryn, P.V. Vasyukevich. Pod redaktsiyey D.A. Buta. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 400 p.
9. Assotsiatsiya «NP Sovet rynka». Issledovaniye №2 «Novyye energeticheskiye tekhnologii» [Yelektronniy resurs] / D.O.Stankevich, A.G.Nikolayev, Ye.V.Andreyeva, M.N.Putlyayeva, V.I.Klepikov, A.V.Shalayev. – Moskva, 2017. – 144p. Rezhim dostupa: https://www.npsr.ru/sites/default/files/sr_pages/SR_0V055968/i2_novye_energeticheskie_tehnologii.pdf.
10. Nakhodov V. F. Opredeleniye pervoocherednykh napravleniy sovershenstvovaniya differentsirovannykh tarifov na elektricheskuyu energiyu. / V. F. Nakhodov, A. I. Zamulko, Mokhammad Al' Sharari, YU. N. Isayenko. // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2015. – №1(78). – pp. 24–32.

Поступила (received) 01.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савченко Наталья Афанасьевна (Савченко Наталія Панасівна, Natalya Savchenko) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра машиностроєння ДонНАСА; г. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7046-0633>; e-mail: natali_a_savchenko@ukr.net

Шевченко Сергій Юрійович (Шевченко Сергій Юрійович, Sergey Shevchenko) – доктор технічних наук, професор, кафедра передачі електричної енергії, НТУ «ХПІ»; г. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9658-7787>; e-mail: syurik42@gmail.com.